



(19)  
Bundesrepublik Deutschland  
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) DE 102 28 946 A1 2004.01.22

(12)

## Offenlegungsschrift

(21) Aktenzeichen: 102 28 946.8

(22) Anmeldetag: 28.06.2002

(43) Offenlegungstag: 22.01.2004

(51) Int Cl.<sup>7</sup>: G02B 26/00  
G02B 26/02, G02B 5/28, G02F 1/21

(71) Anmelder:  
Universität Bremen, 28359 Bremen, DE

(74) Vertreter:  
Eisenführ, Speiser & Partner, 28195 Bremen

(72) Erfinder:  
Panitz, Meik, Dipl.-Ing., 28195 Bremen, DE;  
Benecke, Wolfgang, Prof. Dr., 27412 Vorwerk, DE;  
Binder, Josef, Prof. Dr., Hauppauge, N.Y., US

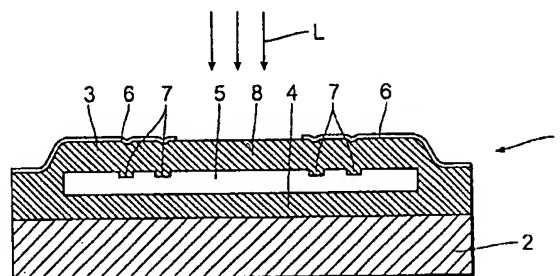
Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

(54) Bezeichnung: **Optischer Modulator**

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft einen optischen Modulator zum Modulieren der Intensität und/oder Phase von einfallendem Licht mittels konstruktiver oder destruktiver Interferenz mit einem auf einem Substrat aufgetragenen Basisschicht und wenigstens einer darauf angebrachten Membranschicht, wobei zwischen der Basisschicht und der wenigstens einen Membranschicht in einem Teilbereich ein Hohlraum gebildet ist, und mit Mitteln zum Anlegen einer elektrischen Spannung zwischen der Membranschicht und dem Substrat zur Veränderung des Abstandes in dem durch den Hohlraum gebildeten Teilbereich zwischen der Basisschicht und der wenigstens einen Membranschicht, wobei die diesem Teilbereich gegenüberliegende Fläche der Außenseite der wenigstens einen Membranschicht eine optisch nutzbare Fläche bildet. Um die Herstellung eines solchen optischen Modulators zu vereinfachen, die Qualität zu verbessern und den Modulator als optisches Schaltelement im sichtbaren Spektralbereich einsetzen zu können, beispielsweise in einem Projektionsdisplay, ist erfindungsgemäß vorgesehen, dass die Basisschicht und die wenigstens eine Membranschicht aus Siliziumnitrid, insbesondere LPCVD-Siliziumnitrid, hergestellt sind.

Des Weiteren betrifft die Erfindung ein vereinfachtes Herstellungsverfahren für einen solchen optischen Modulator.



**Beschreibung**

[0001] Die Erfindung betrifft einen optischen Modulator zum Modulieren der Intensität und/oder Phase von einfallendem Licht mittels konstruktiver oder destruktiver Interferenz mit einer auf einem Substrat aufgetragenen Basisschicht und wenigstens einer darauf angebrachten Membranschicht, wobei zwischen der Basisschicht und der wenigstens einen Membranschicht in einem Teilbereich ein Hohlraum gebildet ist, und mit Mitteln zum Anlegen einer elektrischen Spannung zwischen der Membranschicht und dem Substrat zur Veränderung des Abstandes in dem durch den Hohlraum gebildeten Teilbereich zwischen der Basisschicht und der wenigstens einen Membranschicht. Die Erfindung betrifft ferner die Verwendung eines solchen optischen Modulators sowie ein Verfahren zur Herstellung eines solchen optischen Modulators, wie es im Oberbegriff des Anspruchs 19 angegeben ist.

[0002] Interferenz von Licht, das an den Grenzflächen von Ein- oder Mehrschichten reflektiert wird, erlaubt beispielsweise die Herstellung von dielektrischen Multilayer-Spiegeln, bei denen konstruktive Interferenz ausgenutzt wird, oder von Antireflexbeschichtungen, bei denen destruktive Interferenz ausgenutzt wird. Diese beiden Beschichtungen haben jeweils eine gegenteilige Wirkung auf das auftretende Licht. Ein Schichtstapel, der durch mechanische Deformation von einem Multilayer-Spiegel in eine Antireflexbeschichtung umgewandelt werden kann, kann somit als optischer Schalter oder optischer Modulator verwendet werden.

[0003] Ein solcher optischer Modulator ist aus der US 5,986,796 bekannt. Darin ist ein Gitter aus mehreren, auf verschiedene Frequenzen eingestellten „optischen“ Modulatoren beschrieben. Mittels einer Opferschichtätzung ist dort ein Hohlraum zwischen zwei Schichten gebildet, die gemäß bevorzugten Ausgestaltungen aus dielektrischem oder metallischem Material bestehen. Die einzelnen Schichten der Modulatoren werden durch Sputtern und/oder Aufdampfen gebildet. Dies führt in der Praxis zu technischen Schwierigkeiten bei der Herstellung, ist kostenintensiv und kann auch Qualitätsverluste mit sich bringen.

[0004] Der vorliegenden Erfindung liegt demnach die Aufgabe zugrunde, einen einfacher herzustellenden und eine höhere Qualität aufweisenden optischen Modulator anzugeben. Des weiteren liegt der Erfindung die Aufgabe zugrunde, ein verbessertes Herstellungsverfahren für einen solchen optischen Modulator anzugeben.

[0005] Diese Aufgaben werden erfindungsgemäß dadurch gelöst, dass die Basisschicht und die wenigstens eine Membranschicht aus Siliziumnitrid, insbesondere LPCVD-Siliziumnitrid, hergestellt sind. Die Erfindung macht sich dabei zunutze, dass Siliziumnitrid im sichtbaren Spektralbereich in sehr guter Näherung den Brechungsindex aufweist, der zur Her-

stellung einer Antireflexbeschichtung für Silizium notwendig ist, wenn der optische Modulator auch im Reflexbetrieb genutzt werden soll. Dieser Brechungsindex kann bei Bedarf durch Vergrößerung des Siliziumanteils im Membranmaterial erhöht, oder durch Zugabe von Siliziumdioxid erniedrigt werden. Damit eignet sich ein solcher optischer Modulator insbesondere für den Betrieb in Reflexion bzw. Absorption (bei Veränderung des Abstandes zwischen der Basisschicht und der wenigstens einen Membranschicht). Der Absorptionskoeffizient von Siliziumnitrid ist im sichtbaren Spektralbereich auch sehr klein, während die mechanische Stabilität sehr hoch ist. Durch die Prozessparameter ist eine leichte Zugspannung einstellbar (z.B. 200MPa), was für eine gespannte, ebene Membran wichtig ist.

[0006] Das bevorzugt eingesetzte LPCVD-Siliziumnitrid (LPCVD = Low Pressure Chemical Vapour Deposition; chemisches Abscheidungsverfahren aus der Gasphase unter niedrigem Druck) kann im Gegensatz zu beispielsweise gesputterten oder aufgedampften Schichten im Batch-Prozess abgeschieden werden. Außerdem besitzt es eine gute Homogenität und eine geringe Oberflächenrauigkeit. Durch nasschemisches Abdünnen kann die Dicke der Membranen nachträglich genau eingestellt werden. Das nasschemische Abdünnen ist ohne Aufrauen der Oberfläche möglich. LPCVD-Siliziumnitrid wird auch fast nicht von heißer konzentrierter Kalilauge angegriffen, weshalb bei Verwendung von Polysilizium-Opferschichten zur Herstellung des Hohlraums, wie es gemäß einer bevorzugten Ausgestaltung vorgesehen ist, die Membranen und die Basisschicht auf einfache Weise hergestellt werden. Siliziumnitrid ist thermisch auch sehr stabil und im Gegensatz zu metallischen Spiegelflächen unempfindlich gegen Oxidation beim Betrieb. Darüber hinaus wirken die Membranen und die Basisschicht auch gleichzeitig als Isolator zwischen den beiden Mitteln zum Anlegen einer elektrischen Spannung, also beispielsweise einer auf die äußerste Membranschicht aufgetragenen Elektrode und dem als weitere Elektrode (Gegenelektrode) dienenden Substrat oder einer separat vorgesehenen Gegenelektrode.

[0007] Bevorzugte Ausgestaltungen des erfindungsgemäßen optischen Modulators sind in den Ansprüchen 2 bis 15 angegeben. Bevorzugte Ausgestaltungen des erfindungsgemäßen Herstellungsverfahrens sind in den Ansprüchen 19 bis 24 angegeben. Der erfindungsgemäße Modulator eignet sich insbesondere zum Modulieren der Intensität und/oder der Phase von Licht, zum Schalten von Licht und/oder zur Korrektur von Wellenfronten von einfallendem Licht, wie es in Anspruch 17 angegeben ist. Darüber hinaus betrifft die Erfindung auch ein Display, insbesondere ein Projektionsdisplay, mit einer Vielzahl von an Gitterpunkten eines Gitters angeordneten optischen Modulatoren gemäß der Erfindung und mit einer Steuereinheit zur Ansteuerung der Modulatoren, wie es in Anspruch 16 angegeben ist. Be-

sonders bevorzugt ist auch die Anwendung des erfindungsgemäßen optischen Modulators als Speicherelement, da eine einmal angelegte Spannung auch bei Abnahme der Spannung für lange Zeit gehalten werden kann, also ein bestimmter Schaltzustand beibehalten bleibt, ohne ständig elektrische Energie zuzuführen.

[0008] Gemäß einer bevorzugten Ausgestaltung der Erfindung ist vorgesehen, dass die dem Hohlraum zuweisende Fläche der Basisschicht und/oder der wenigstens einen Membranschicht in den Hohlraum hineinragende Abstandshalter aufweist. Diese können bei der Herstellung des Hohlraumes, beispielsweise durch Strukturierung der Opferschicht, mit hergestellt werden und dienen dazu, das Aufliegen der mit den Abstandshaltern Schicht auf der anderen Schicht zu verhindern, so dass eine Haftung der Schichten aneinander vermieden wird. Weiterhin bilden diese Abstandshalter einen Anschlag für die ausgelenkte Membran, um damit eine Verminderung der Exemplarstreuung (entspricht Schwankung der Bauteileigenschaften) und Drift bei räumlich und zeitlich (thermisch) veränderlicher Schichtspannung zu erreichen. Schließlich kann bei Betrieb in Luft auch eine Erhöhung der Schaltgeschwindigkeit erreicht werden.

[0009] Bevorzugt ist die Aufbringung einer Elektrode nur in einem Elektrodenteilbereich der äußersten Membranschicht, wie es gemäß Anspruch 3 vorgesehen ist. Der verbleibende Bereich der äußersten Membranschicht definiert somit eine optisch nutzbare Fläche, auf die das Licht bevorzugt einfallen soll. Zumindest unterhalb dieser optisch nutzbaren Fläche ist der Hohlraum gebildet und erfolgt durch Anlegung der elektrischen Spannung die Abstandsveränderung zwischen der wenigstens einen Membran und der Basisschicht.

[0010] Gemäß einer alternativen Ausgestaltung können jedoch auch transparente Elektroden verwendet werden, die bevorzugt als dünne dotierte Polysiliziumschicht, also eine polykristalline Siliziumschicht, gebildet sind. Solche transparenten Elektroden können dann auch im gesamten Oberflächenbereich der äußersten Membranschicht aufgebracht sein. Eine solche Ausgestaltung eignet sich insbesondere zum Betrieb des optischen Modulators in Transmission, wenn, wie in einer weiteren bevorzugten Ausgestaltung vorgesehen ist, auch das Substrat aus transparentem Material, insbesondere Quarz, hergestellt ist oder wenn das Substrat unterhalb des Hohlraums ein oder mehrere Löcher aufweist zum Ankoppeln von Bauelementen, z.B. Lichtleitfasern. Als Gegenelektrode für die auf der Außenseite der äußersten Membranschicht aufgebrachte transparente Elektrode kann dann das Substrat nicht unmittelbar dienen, sondern ist eine weitere transparente Schicht, beispielsweise eine dünne Polysiliziumschicht, zusätzlich in oder auf dem transparenten Substrat gebildet.

[0011] Der erfindungsgemäße Modulator kann für

eine gewünschte Wellenlänge dadurch optimiert werden, dass die Schichtdicken der Membranschichten geeignet gewählt sind. Diese können so eingestellt werden, dass der optische Modulator als optischer Schalter verwendet werden kann, bei dem bei einer bestimmten Wellenlänge bzw. einem Wellenlängenbereich Schaltzustände „ein“ (maximale Intensität) und „aus“ (minimale Intensität) erzielt werden. Die Wellenlänge, für die der Modulator optimal funktioniert, ist dabei vom Einfallswinkel des Lichts abhängig!

[0012] Eine Erhöhung der Lichtausbeute des einfallenden Lichts kann, wie in einer weiteren Ausgestaltung vorgesehen ist, mittels einer Mikrolinse, eines Mikrolinsengitters oder eines diffraktiven optischen Elements (DOE), insbesondere, was besonders einfach und günstig ist, mittels eines einstufigen diffraktiven optischen Elements, erzielt werden. Dieses dient dazu, das einfallende Licht auf die optisch nutzbare Fläche oder ein anderes Objekt, z.B. ein angekoppeltes Bauelement wie eine Lichtleitfaser oder eine Bildarstellungsfläche oder Objekt, welches durch einen Laser strukturiert werden soll, zu fokussieren. Da bei dem erfindungsgemäßen optischen Modulator bei geeigneter Ausgestaltung etwa 50% der gesamten Oberfläche der äußersten Membranschicht optisch nutzbar ist und bevorzugt nur Licht einer bestimmten Farbe geschaltet bzw. moduliert werden soll, ist es vorteilhaft möglich, ein diffraktives optisches Element mit nur einer Maskenebene (Stufe) herzustellen und zu nutzen, welches das Licht auf 50% der Fläche konzentriert und einen theoretischen Wirkungsgrad von 90% aufweist.

[0013] Anwendung findet der erfindungsgemäße optische Modulator beispielsweise zur Laserbeschriftung, -strukturierung und -lithographie, wobei das einfallende Licht mittels einer solchen Mikrolinse, eines Mikrolinsengitters oder eines DOE's auf das zu strukturierende Objekt fokussiert werden kann. Diese Fokussierungsmittel ersparen dabei eine Abbildung des modulierten bzw. geschalteten Lichts durch ein separates Objektiv.

[0014] Eine Vergrößerung der schaltbaren Bandbreite des einfallenden Lichts wird bei einer Weiterbildung der Erfindung mittels eines Beugungselements, insbesondere mittels eines Beugungsgitters oder eines Prismas, erreicht. Dadurch wird das einfallende Licht derart gebeugt, dass die Spektralanteile des einfallenden Lichts unter verschiedenen Winkeln auf die optisch nutzbare Fläche der äußersten Membranschicht auftreffen. Dadurch kann jede Wellenlänge mit dem für sie optimalen Winkel durch den Modulator hindurchtreten, so dass das verwendbare Wellenlängenintervall vergrößert werden kann. Eine weitere Verbesserung kann erreicht werden, wenn das einfallende Licht vor dem Auftreffen auf dem Modulator polarisiert wird, dessen Bandbreite besonders gut erhöht werden kann.

[0015] Die Ankoppelung an eine Lichtleitfaser wird gemäß einer bevorzugten Ausgestaltung mittels ei-

ner zentral dem Hohlraum gegenüberliegenden Loch in dem Substrat erzielt, in die die Lichtleitfaser eingebracht, justiert und fixiert werden kann. Ein solches Loch wird bevorzugt durch Ätzen, insbesondere Trockenätzen mit einem ASE-Verfahren (ASE = Advanced Silicon Etching) oder anisotropes, nasschemisches Ätzen, erzeugt.

[0016] Durch das erfindungsgemäße Herstellungsverfahren kann erreicht werden, dass der Hohlraum und die aus Siliziumnitrid hergestellten Schichten eine im Wesentlichen gleichmäßige Dicke und Homogenität aufweisen, was zu einer verbesserten Modulation, insbesondere zu einer höheren Genauigkeit hinsichtlich der Lichtwellenlänge, bei der die Intensität moduliert wird, führt. Dazu trägt auch die mit dem erfindungsgemäßen Herstellungsverfahren ermöglichte exakte Einstellung der Schichtdicke der Schichten bei.

[0017] Zur Modulation der Lichtintensität kann sowohl eine analoge als auch eine digitale, insbesondere pulsweitenmodulierte, Steuerspannung verwendet werden. Bevorzugt wird jedoch in einer weiteren Ausgestaltung die optisch nutzbare Fläche in mehrere Teilflächen, insbesondere unterschiedlicher Größe, und die Elektrode in den Teilflächen zugeordnete, separat ansteuerbare Teilelektroden unterteilt. Durch einzelne bzw. kombinierte Ansteuerung der separaten Teilflächen der optisch nutzbaren Fläche können somit verschiedene Intensitätswerte erzeugt werden, ohne dass die Schaltelemente, wie bei der Verwendung von pulsweitenmodulierten Signalen, ständig schalten müssen. Dadurch kann die Lebensdauer der optischen Modulatoren deutlich verlängert werden.

[0018] Im allgemeinen werden die optischen Modulatoren bei der Herstellung rasterförmig auf einem Wafer angeordnet, wobei der Umriss der Oberfläche eine rechteckige Form aufweist. In einer bevorzugten Ausgestaltung ist jedoch vorgesehen, dass der Umriss der wenigstens einen Membranschicht, insbesondere der optisch nutzbaren Fläche und der Elektrode, eine hexagonale Form, beispielsweise die Form einer Wabe, aufweist. Neben einer optimalen Flächennutzung können dadurch eine gute allseitige Aufhängung der Membranschichten erreicht und die Auswirkungen eines Stressgradienten vermieden werden. Auch andere Formen sind jedoch denkbar, wobei Formen, bei denen eine allseitige Aufhängung der Membranschichten erzielt wird, besonders bevorzugt sind.

[0019] Bevorzugt ist eine Ausgestaltung, bei der genau eine Basisschicht und eine Membranschicht, zwischen denen der Hohlraum liegt, vorgesehen sind. Es ist jedoch grundsätzlich möglich, einen Schichtstapel vorzusehen, der mehr als eine Membranschicht und dann ggf. auch mehr als einen Hohlraum aufweist, also z.B. wechselweise eine Membranschicht und einen Hohlraum aufweist, so dass bei Anlegen einer elektrischen Spannung mehrere Membranschichten durchgebogen werden. Außerdem

kann auch vorgesehen sein, dass zusätzliche weitere Schichten, wie z.B. zusätzliche Silizium oder Siliziumoxidschichten in dem Schichtstapel enthalten sind.

[0020] Der Hohlraum wird erfindungsgemäß bevorzugt mittels einer Opferschicht hergestellt, die nach Bildung der beiden angrenzenden Membranschichten herausgeätzt wird. Bevorzugt ist die Opferschicht aus polykristallinem Silizium (Polysilizium) hergestellt.

[0021] Vorteilhaft ist insbesondere die Herstellung des Hohlraums mittels zweier Opferteilschichten, insbesondere einer Polysiliziumschicht und einer Siliziumoxidschicht, die vorzugsweise beide thermisch ausreichend stabil und mit hoher Homogenität abscheidbar sind. Die eine Opferteilschicht, vorzugsweise die Siliziumoxidschicht, kann dabei zur Bildung der Abstandshalter strukturiert werden. Die zweite Opferteilschicht, also die Polysiliziumschicht, dient dann beim Ätzen der Siliziumoxidschicht als Ätzstopp. Dadurch lässt sich eine wesentlich bessere Gleichmäßigkeit der Höhe der Abstandshalter erreichen.

[0022] In einer weiteren Ausgestaltung ist bewusst vorgesehen, dass die wenigstens eine Membranschicht einen positiven Stressgradienten aufweist, um das Anhaften an der Basisschicht zu vermeiden. Ein Verfahren zur Einstellung eines solchen positiven Schichtgradienten ist in Anspruch 24 angegeben.

[0023] Der erfindungsgemäße Modulator lässt sich vorteilhaft insbesondere als optisches Schaltelement im sichtbaren Spektralbereich einsetzen. Solche Schaltelemente können beispielsweise in einem Projektionsdisplay zum Einsatz kommen. Auch die Anwendung in der Telekommunikation via Glasfaser ist möglich. Prinzipiell können derartige Schalter aber auch zur Korrektur von Wellenfronten eingesetzt werden wobei die Phase des Lichts beeinflusst werden kann (adaptive Optik).

[0024] Gegenüber der konventionellen LCD-Technologie bestehen die wesentlichen Vorteile darin, dass der optische Modulator gemäß der Erfindung eine höhere Temperaturbeständigkeit aufweist und deshalb in Projektoren mit hoher Leistung gut einsetzbar ist, eine höhere Schaltgeschwindigkeit zeigt, geringe Absorptionsverluste aufweist und kaum eine Polarisationsabhängigkeit des modulierten Lichts besteht.

[0025] Die Erfindung wird nachfolgend anhand der Zeichnungen näher erläutert. Es zeigen:

[0026] Fig. 1 eine erste Ausgestaltung eines erfindungsgemäßen Modulators, in zwei Schaltzuständen,

[0027] Fig. 2 das Spektrum des Modulators gemäß Fig. 1,

[0028] Fig. 3 eine zweite Ausgestaltung eines erfindungsgemäßen Modulators,

[0029] Fig. 4 das Spektrum des Modulators gemäß Fig. 3,

[0030] Fig. 5 eine weitere Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Modulators mit einer Mikrolinse,

[0031] Fig. 6 zwei Ausgestaltungen von diffraktiven optischen Elementen zum Einsatz bei der Erfindung,

[0032] Fig. 7 eine weitere Ausgestaltung eines erfindungsgemäßen Modulators mit einem Beugungsgitter,

[0033] Fig. 8 eine Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Modulators mit angekoppelter Lichtleitfaser,

[0034] Fig. 9 die Prozessschritte bei der Herstellung des erfindungsgemäßen Modulators,

[0035] Fig. 10 einen Prozessschritt bei der Herstellung des Hohlraums mittels einer Opferschicht, welche aus zwei Teilschichten aufgebaut ist,

[0036] Fig. 11 eine Draufsicht auf den unterteilten optisch nutzbaren Bereich und die entsprechend unterteilte Elektrode,

[0037] Fig. 12 die wabenförmige Anordnung der Modulatoren auf einem Wafer, und

[0038] Fig. 13 die Auswirkungen eines Stressgradienten.

[0039] Eine erste Ausgestaltung eines erfindungsgemäßen optischen Modulators in zwei Schaltzuständen ist in den Fig. 1a und 1b gezeigt. Der optische Modulator 1 weist einen Schichtstapel aus mehreren Schichten auf. Auf einem Silizium-Substrat 2 sind bei der gezeigten Ausgestaltung eine Membranschicht 3 und eine Basisschicht 4 aufgebracht, die sich in den Randbereichen berühren, aber in dem größten zentralen Bereich durch einen Hohlraum 5 getrennt sind. In einem Elektrodenteilbereich ist auf die Oberfläche der Membranschicht 3, also der im gezeigten Fall dem einfallenden Licht L zugewandten Lichteinfallseite, eine Elektrode 6 aufgebracht. Zwischen der Elektrode 6 und dem Substrat 2 kann eine elektrische Spannung angelegt werden, um den Abstand zwischen den beiden Schichten 3, 4 zu verändern. Um ein Anhaften der Schichten aneinander zu vermeiden, sind außerdem Abstandshalter (spacer-bumps) 7 vorgesehen, die an der in den Hohlraum 5 hineinragenden Unterseite der oberen Membran 3 gebildet sind. Der zentrale Bereich der Membran 3, der oberhalb des Hohlraums 5 zwischen den Abstandshaltern und zwischen den beiden Elektroden 6 liegt, bildet eine optisch nutzbare Fläche 8, auf die das einfallende Licht L bevorzugt auftreffen soll und in dem die Veränderung des Abstands zwischen den Schichten 3 und 4 zur Veränderung der Intensität des einfallenden Lichts L wesentlich ist.

[0040] Der erfindungsgemäße optische Modulator nutzt das Prinzip des Fabry-Perot-Interferometers zur Lichtmodulation. Dabei wird ausgenutzt, dass der beschriebene Schichtstapel durch mechanische Deformation quasi von einem Multilayer-Spiegel in eine Antireflexbeschichtung umgewandelt werden kann, so dass der optische Modulator auch als optischer Schalter verwendet werden kann. Die Teilwellen, die an den einzelnen Grenzflächen des Schichtstapels reflektiert werden, überlagern sich dabei in einem Fall konstruktiv und im anderen Fall destruktiv.

[0041] Bei dem in Fig. 1 gezeigten optischen Modulator bestehen die Substratschicht 2 aus Silizium, die Schichten 3, 4 aus Siliziumnitrid und die Elektrode aus Metall, z.B. aus Gold. Der gezeigte Aufbau ist für den Betrieb in Reflexion ausgelegt. Dabei wird ausgenutzt, dass Siliziumnitrid im sichtbaren Spektralbereich in sehr guter Näherung den Brechungsindex aufweist, der zur Herstellung einer Antireflexbeschichtung für Silizium notwendig ist. Dieser Brechungsindex kann bei Bedarf durch Vergrößerung des Siliziumanteils erhöht oder durch Zugabe von Siliziumdioxid erniedrigt werden.

[0042] Durch Anlegen einer elektrischen Spannung zwischen Substrat 2 und Elektrode 6 wird die Membran 3 nach unten gezogen, wie in Fig. 1b gezeigt ist. Dadurch verändert sich die Reflektivität des Schichtstapels. Das Zusammendrücken des Hohlraums 5 wird also durch elektrostatische Kräfte hervorgerufen. Der Hohlraum 5 selbst muss dabei lediglich eine Dicke von einer Viertel Lichtwellenlänge des Lichts L haben. So kann mit sehr kleinen Verstellwegen ein Schaltvorgang oder eine große Intensitätsmodulation bewirkt werden. Die Dicke der gezeigten Schichten 3, 4 und 5 beträgt in der Praxis etwa 200nm, die Breite etwa 200µm.

[0043] Berechnungen der Reflektivität des optischen Modulators mit und ohne angelegte elektrische Spannung sind in Fig. 2 schematisch gezeigt. Die Spektralkurve S1 beschreibt den Schaltzustand „ein“, also maximale Reflektivität. Die Spektralkurve S2 beschreibt den Schaltzustand „aus“, also minimale Reflektivität. Zu erkennen ist, dass der zugehörige Modulator für eine Wellenlänge von etwa 633nm optimiert ist.

[0044] Die in Fig. 3 gezeigte Ausgestaltung des optischen Modulators 1' ist für den Betrieb in Transmission ausgelegt. Dazu wird eine Elektrode 6' aus einer dotierten Polysiliziumschicht, also polykristallinem Silizium, verwendet, die gleichzeitig als Spiegelschicht dient. Dotiertes Polysilizium eignet sich als Material optimal für diese Verwendung, da es einerseits leitfähig ist, andererseits im sichtbaren Spektralbereich eine hohe Reflektivität besitzt, aber im Vergleich zu Metallen wenig Licht absorbiert.

[0045] Die Elektroden 6' und 10 weist auch eine sehr geringe Dicke, beispielsweise 30 bis 40nm, auf, um die Transparenz zu gewährleisten, und könnte auch teilweise aus einem anderen Metall, z.B. Wolfram-Titan, hergestellt sein.

[0046] Das Substrat ist bevorzugt ebenfalls aus transparentem Material, z.B. Quarz, ausgestaltet. Zwischen der unteren Basisschicht 4 und dem transparenten Substrat 2 sind außerdem eine Siliziumoxidschicht 9 sowie eine als Gegenelektrode für die Elektrode 6' dienende Polysiliziumschicht 10 vorgesehen.

[0047] Bei dieser Ausgestaltung des optischen Modulators muss die obere Schicht 6', welche sowohl als Spiegel als auch als Elektrode dient, bei der Opferschichtätzung zur Herstellung des Hohlraums ggf.

geschützt werden. Besteht die Schicht 6' aus Polysilizium, kann darauf zum Schutz z.B. eine dünne, aus Siliziumnitrid bestehende Schutzschicht aufgebracht werden (in Fig. 3 nicht gezeigt).

[0048] Berechnungen der Transmission des in Fig. 3 gezeigten Modulators sind in Fig. 4 schematisch gezeigt. Dabei beschreibt die Spektralkurve S3 den Schaltzustand „ein“ (maximale Intensität) und die Spektralkurve S4 den Schaltzustand „aus“ (minimale Intensität). Der Modulator muss durch Wahl geeigneter Schichtdicken für eine spezielle Wellenlänge ausgelegt werden. In einer Umgebung um diese spezielle Wellenlänge kann dann ein optimaler Kontrast zwischen den beiden Schaltzuständen erreicht werden. Aus Fig. 4 ist zu erkennen, dass der zugehörige Modulator für eine Wellenlänge von etwa 565nm optimiert ist.

[0049] Erfindungsgemäß wird insbesondere LP-CVD-Siliziumnitrid als Membranmaterial eingesetzt, da es die eingangs genannten besonderen Vorteile aufweist, was insbesondere bei der Herstellung des optischen Modulators zu deutlichen Prozessvereinfachungen und Kosteneinsparungen führt und somit die Herstellung eines präzisen und hochqualitativen optischen Modulators ermöglicht. Aufgrund der hohen thermischen Beständigkeit der Materialien Siliziumoxid ( $\text{SiO}_2$ ) und Siliziumnitrid ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) sind die Modulatoren gemäß der Erfindung besonders für den Einsatz in Projektionssystemen mit hoher Leistung geeignet. Zusätzliche Oxidschichten können zur besseren elektrischen Isolation bzw. zur Vermeidung von unerwünschten Aufladungen des Siliziumnitrids in den Schichtstapel eingebracht werden. Des weiteren können auch mehr als eine Membranschicht und/oder ein Hohlraum vorgesehen sein.

[0050] Besonders bevorzugt wird ein low-stress-Siliziumnitrid (Is-Siliziumnitrid) eingesetzt, also ein Siliziumnitrid, das eine Senkung des Schichtstresses bewirkt, und bei dem durch geeignete Wahl der Abscheideparameter eine Senkung des Schichtstresses bewirkt wird. Dazu wird Siliziumnitrid eingesetzt, das einen leicht erhöhten Anteil an Silizium gegenüber dem normalen Siliziumnitrid ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) aufweist, also ein  $\text{Si}_x\text{N}_y$ , für das gilt:  $x/y \geq 3/4$ . Dadurch kann der sehr hohe Schichtstress (etwa 1,5 GPa) von normalem Siliziumnitrid verringert bzw. ganz vermieden werden.

[0051] Von den gezeigten optischen Modulatoren ist im allgemeinen nur der mittlere Bereich 8 der Membran 3 optisch nutzbar. Um möglichst wenig Licht zu verlieren, können die Modulatoren mit Mikrolinsen 11 bzw. Mikrolinsenarrays kombiniert werden, wie in Fig. 5 gezeigt ist. Dadurch wird das über eine große Breite einfallende Licht L1 mittels der Mikrolinse 11 auf die optisch nutzbare Fläche 8 hin fokussiert (L2), und es geht kein Licht mehr an den seitlichen Bereichen neben dem optisch nutzbaren Bereich 8 verloren, in dem die Membran 3 sich nicht so stark durchbiegen lässt. Im Austrittsbereich fächert sich das Licht L3 dann wieder über einen größeren Bereich auf.

[0052] Anstelle von Mikrolinsen können zur Fokussierung des Lichts auf den optisch nutzbaren Bereich des Modulators auch diffraktive optische Elemente (DOE) eingesetzt werden. Solche diffraktiven optischen Elemente bestehen aus geeignet geformten Gitterstrukturen. Das von Gittern gebeugte Licht verteilt sich auf mehrere Beugungsordnungen, wovon meist nur eine verwendet werden kann. Besitzen die Linien eines Gitters jedoch ein geeignetes, sägezahnförmiges Profil, wird das Licht mit hohem Wirkungsgrad in eine bestimmte Beugungsordnung gebeugt. Ein solches diffraktives optisches Element 12 mit einem Sägezahnprofil, das durch mehrere Stufen approximiert wurde, ist in Fig. 6a gezeigt. Durch eine Approximation mit beispielsweise sieben Treppentufen kann theoretisch ein Wirkungsgrad von 90% (in der ersten Beugungsordnung) erzielt werden. Das in Fig. 6a gezeigte diffraktive optische Element wird typischerweise zur Fokussierung von Licht L auf einen Punkt eingesetzt. Mittels einer Blende 13 wird nur dieses gebündelte Licht durchgelassen.

[0053] Bei den erfindungsgemäßen Modulatoren können jedoch zwei Spezialfälle genutzt werden: etwa 50% der Oberfläche des Modulators ist optisch nutzbar und es wird im allgemeinen nur Licht einer einzigen Farbe mittels eines einzelnen Modulators moduliert bzw. geschaltet. Deshalb ist es möglich, mit nur einer Maskenebene (Stufe) ein diffraktives optisches Element herzustellen, welches das Licht auf 50% der Fläche konzentriert und ebenfalls einen theoretischen Wirkungsgrad von 90% aufweist. Ein solches diffraktives optisches Element 14 mit einem einstufigen Gitter und einer Zwei-Loch-Blende 15 ist in Fig. 6b gezeigt. Während bei dem in Fig. 6a gezeigten Element nur die +1. Beugungsordnung genutzt wird, wird bei dem in Fig. 6b gezeigten Element sowohl die +1. als auch die -1. Beugungsordnung der gezeigten Gitterstrukturen genutzt. Beide Elemente besitzen einen theoretischen Wirkungsgrad von 90%, womit der Anteil des auftreffenden Lichtes L gemeint ist, der durch die Blenden 13 bzw. 15 unterhalb der Elemente 12, 14 wieder austritt.

[0054] Die Wellenlängen, für die der erfindungsgemäße Modulator optimal arbeitet, sind nicht nur von den Schichtdicken, sondern auch vom Einfallswinkel des einfallenden Lichts abhängig. Wird das einfallende Licht L1, wie in Fig. 7 gezeigt ist, durch eine entsprechende Gitterstruktur 16 oder ein Prisma derart gebeugt, dass jede Wellenlänge mit dem für sie optimalen Winkel durch den Modulator 1' hindurchtritt (L2), so kann das verwendbare Wellenlängenintervall des Lichts vergrößert werden. Der Ablenkwinkel, um den das einfallende weiße Licht L1 von der Gitterstruktur 16 gebeugt wird, um das gebeugte Licht L2 zu erzeugen, ist folglich von der Farbe (der Wellenlänge) des Lichts abhängig. Die Gitterkonstante 16, also die Dichte der Gitterlinien des Gitters, ist also so zu wählen, dass jede Wellenlänge in möglichst guter Näherung im optimalen Winkel auf den Modulator 1' auftrifft. Optimal heißt in diesem Zusammenhang,



dass eine möglichst hohe Ausbeute, d.h. ein hoher Wirkungsgrad, und ein möglichst hoher Kontrast, d.h. ein großes Verhältnis zwischen Ein- und Auszustand erreicht wird.

[0055] Insbesondere für Telekommunikationsanwendungen sind Schalter von Interesse, die leicht mit Lichtleitfasern zu verbinden sind. Dabei besteht normalerweise das Problem, dass das aus einer Lichtleitfaser mit dem Winkel  $\alpha$  austretende Licht auf die optisch nutzbare Fläche fokussiert werden muss. Durch die Integration von Beugungsoptiken 17, z.B. Fresnelschen Zonenplatten, ggf. mit Stufenprofilen, auf die optisch nutzbare Fläche 8 (oder auf einem Träger direkt darüber) kann dieses Problem umgangen werden. Eine Ausgestaltung eines optischen Modulators 1" mit einer solchen Zonenplatte 17 ist in Fig. 8 gezeigt. Mittels einer ersten Lichtleitfaser 18 wird Licht L1, das aus der Lichtleitfaser 18 unter dem Winkel  $\alpha$  austritt, auf die optisch nutzbare Fläche 8 fokussiert. Das mittels des Modulators 1" modulierte austretende Licht L2 wird in eine zweite Lichtleitfaser 19 wieder eingekoppelt, wodurch die direkt auf der Membran 3 aufgebrachte Zonenplatte 17 dazu dient, das Licht auf den Fasereingang der Lichtleitfaser 19 zu fokussieren.

[0056] Der Faserausgang der Lichtleitfaser 18 und der Fasereingang der Lichtleitfaser 19 befinden sich dabei jeweils im Brennfleck B der Zonenplatte 17. Die Justierung der Lichtleitfaser 19 kann dabei über ein Loch erfolgen, welches von der Rückseite her in das Substrat, beispielsweise mittels eines Silizium-Ätzverfahrens, z.B. mittels ASE, durch den Wafer geätzt wurde.

[0057] Zonenplatten auf optischen Modulatoren können nicht nur zum Fokussieren von Licht, welches von einer Glasfaser kommt, in eine andere Glasfaser benutzt werden, sondern überhaupt zum Abbilden oder Fokussieren des geschalteten Lichtes. Eine andere Anwendung ist z.B. das Belichten von Mustern (Lithographie). Die diffraktiven optischen Elemente (speziell Fresnelsche Zonenplatten) auf den Modulatoren erzeugen dabei Brennflecken eines Lasers, welche z.B. einen Fotolack belichten oder auf andere Weise eine Oberfläche verändern.

[0058] Die Herstellung des optischen Modulators gemäß der Erfindung soll nachfolgend anhand von Fig. 9 näher erläutert werden. Zunächst wird als Substrat 2 ein Siliziumwafer bereitgestellt (Fig. 9a). Darauf wird eine Siliziumnitridschicht als Basisschicht 4 durch Abscheidung aus der Gasphase mittels eines LPCVD-Verfahrens abgeschieden (Fig. 9b). Darauf wird mittels des LPCVD-Verfahrens eine Polysiliziumschicht abgeschieden, mittels der die Opferschicht gebildet wird, die in einem späteren Verfahrensschritt herausgeätzt wird, um den Hohlraum 5 zu bilden (Fig. 9c). Diese Polysiliziumschicht 20 wird danach hinsichtlich der Breite strukturiert, um die Breite des späteren Hohlraums einzustellen (Fig. 9d). Außerdem wird in die Oberfläche der Polysiliziumschicht 20 die Struktur für die Abstandshalter

7 eingebracht (Fig. 9e). In einem weiteren Abscheidungsschritt (Fig. 9f) wird mittels des LPCVD-Verfahrens die Membranschicht 3 aus Siliziumnitrid derart aufgebracht, dass die Polysiliziumschicht 20 vollständig und der Randbereich der ersten Membranschicht 4 überdeckt sind. In die Membranschicht 3 werden sodann Ätzgräben 21 bis zur Polysiliziumschicht 20 eingebracht (Fig. 9g), um später die Polysiliziumschicht 20 als Opferschicht herausätzen zu können. Danach wird die Elektrode 6 durch Aufputtern, beispielsweise als Chrom- und Goldschicht auf die Membran 3 aufgebracht (Fig. 9h). In einem weiteren Verfahrensschritt werden die Elektroden, Leiterbahnen und Bondpads strukturiert (Fig. 9i). Dabei wird insbesondere die optisch nutzbare Fläche 8 gebildet, indem dort die Elektrodenschicht 6 wieder entfernt wird. Schließlich wird die Polysiliziumschicht 20 durch die Ätzgräben 21 herausgeätzt, um so den Hohlraum 5 zu bilden (Fig. 9j).

[0059] Bei der Herstellung des Modulators wird also mit einem Ätzmittel, z.B. KOH, eine Opferschicht zwischen der Basisschicht 4 und der Membran 3 herausgelöst. Gleichzeitig werden die Abstandshalter, die durch die Strukturen in der Opferschicht erzeugt wurden, freigelegt. Weiterhin erlaubt der verbleibende, sehr flache Zwischenraum unter der ausgelenkten Membran 3 (siehe Fig. 1b) auch den Einsatz von Siliziumnitrid mit erhöhtem Siliziumanteil, welches zwar aufgrund seiner geringeren mechanischen Spannung besonders gut geeignet ist, jedoch nicht exakt die Bedingung für die Antireflexbeschichtung erfüllt.

[0060] Für die Erzeugung der Abstandshalter ist es erforderlich, die Opferschicht vor der Abscheidung des Membranmaterials zu strukturieren, wie in Fig. 9e gezeigt ist. Da die Abstandshalter alle die gleiche Dicke haben müssen, ist bei der Verwendung einer einfachen Opferschicht ein Ätzprozess mit einer über den gesamten Wafer konstanten Ätzrate erforderlich. Diese Homogenität ist bei trockenchemischen Ätzprozessen insbesondere am Rand oft nicht gegeben. Bei der nasschemischen Ätzung von Polysiliziumopferschichten wurde eine stark schwankende Ätzrate, eine schlechte Homogenität und ein Aufrauen der Polysiliziumschicht festgestellt. Sowohl beim nass- als auch beim trockenchemischen Ätzen ist es jedoch erforderlich, die Ätztiefe über die Ätzdauer einzustellen. Dieses Problem kann durch eine zweigeteilte Opferschicht umgangen werden, wie sie in Fig. 10 gezeigt ist. Dabei wird die Opferschicht 20 aus zwei Schichten 201, 202 aufgebaut, die beide thermisch ausreichend stabil und mit hoher Homogenität abscheidbar sind. Die obere Opferteilsschicht 201 hat dabei genau die Dicke der späteren Abstandshalter 7. Diese Schicht 201 wird dann in einem nasschemischen Ätzprozess mit hoher Selektivität zur darunter liegenden Opferteilsschicht 202 strukturiert. Als Beispiel eignet sich eine Opferteilsschicht 202 aus etwa 100nm Polysilizium und eine Opferteilsschicht 201 aus etwa 100nm Siliziumoxid (z.B. TEOS, HTO). Eine Opferschicht aus Siliziumoxid al-

leine ist aufgrund ihrer viel zu geringen Ätzrate nicht als Opferschicht bei einer KOH-Ätzung einsetzbar. Die Polysilizium-Opferschicht **202** wird beim Durchätzen der Oxidschicht **201** zur Bildung der Abstandshalter gleichzeitig auch als Ätzstopp benutzt.

[0061] Um die Schichtdicken möglichst exakt einzustellen, kann einerseits die Rate bei der Abscheidung des Schichtmaterials sehr genau untersucht oder zunächst eine etwas zu dicke Schicht abgeschieden werden, um danach die Dicke zu messen und dann nasschemisch auf den gewünschten Wert abzdünnen. Dabei ist es wichtig, dass der verwendete Ätzprozess die Oberfläche nicht aufraut, da dies zur Lichtstreuung führen würde. Siliziumnitrid lässt sich z.B. durch Flusssäure oder Ammoniumfluorid-Ätzmischung (BOE) abdünnen. Bei polykristallinem Silizium ist dies schwieriger; die gängigen Ätzmittel rauhen die Oberfläche stark auf bzw. verursachen einen sehr inhomogenen Ätzangriff der Schicht. Dieses Problem kann ebenfalls durch die Verwendung einer zweigeteilten Opferschicht gelöst werden, da hier die obere Schicht z.B. aus  $\text{SiO}_2$  besteht. Dieses kann wiederum gut durch z.B. Flusssäure oder eine Ammoniumfluorid-Ätzmischung (BOE) abgedünnt werden.

[0062] Es gibt drei prinzipielle Verfahren, um mit den beschriebenen Modulatoren abgestufte Intensitäten (Graustufen, Dynamik) zu erzeugen:

- a) Analoge Steuerung: über eine analoge Steuerungsspannung wird die Membran kontinuierlich ausgelenkt. Dabei sind kontinuierlich abgestufte Helligkeiten, je nach Auslenkung der Membran, einstellbar.
- b) Digitale Ansteuerung durch pulsweitenmoduliertes Signal: Innerhalb eines zeitlichen Auflösungsintervalls (der Bildwiederholdauer) wird der Modulator, je nach gewünschter Helligkeit, für die entsprechende Dauer eingeschaltet.
- c) Digitale Steuerung durch verschieden große Flächenelemente für ein Pixel: Jedes Pixel kann in Sub-Pixel verschiedener Größe aufgeteilt werden. Dies wird durch Unterteilung des optisch nutzbaren Bereichs **8**, wie in Fig. 11 gezeigt, in mehrere Teilbereiche **81**, **82**, **83**, **84** und entsprechende Unterteilung der Elektrode **6** in Teilelektroden **61**, **62**, **63**, **64** erreicht. Durch kombiniertes Einschalten der einzelnen Teilbereiche **81** bis **84** können verschiedene Helligkeitswerte erzeugt werden. Bei diesem Verfahren werden deutlich weniger Schaltvorgänge zur Helligkeitsmodulation benötigt, als bei dem unter b) erwähnten Verfahren. Soll z.B. ein Pixel mit einer bestimmten Helligkeit gehalten werden, muss das optische Schaltelement bei dem unter b) erwähnten Verfahren kontinuierlich mit dem entsprechenden pulsweitenmodulierten Signal ein- und ausgeschaltet werden. Bei der Verwendung von Sub-Pixeln mittels der beschriebenen Teilbereiche sind dafür keine Schaltvorgänge nötig. Dadurch kann die Lebensdauer des Modulators stark verlängert werden. Bei dem in Fig. 11 gezeigten Ausführungs-

beispiel ist der optisch nutzbare Bereich **8** in vier unterschiedlich große Teilflächen **81** bis **84** unterteilt, so dass sich insgesamt  $2^4 = 16$  Helligkeitswerte realisieren lassen.

[0063] Im allgemeinen weisen die optisch nutzbare Fläche **8** und die Elektrode **6** bzw. die Teilelektroden auf beiden Seiten der optisch nutzbaren Fläche **8** jeweils eine rechteckige Form auf. Bevorzugt können die optisch nutzbare Fläche und die Elektrode jedoch auch eine hexagonale Form aufweisen, wie in Fig. 12 gezeigt ist. Bei der Platzierung einer Vielzahl von optischen Modulatoren auf einem Wafer kann somit eine wabenförmige Anordnung der Modulatoren erreicht werden, was einerseits die verfügbare Fläche bestmöglich ausfüllt. Darüber hinaus wird dadurch eine gut allseitige Aufhängung der Modulatoren und eine Vermeidung der Auswirkung des Stressgradienten der Membranschicht, insbesondere ein. Aufwollen der Membranschicht, erzielt.

[0064] Ein wesentlicher Vorteil des erfindungsgemäßen Modulators besteht darin, dass er sich elektrisch wie ein Kondensator verhält und somit elektrische Ladungen bzw. Daten speichern kann. Für ausreichend gute Isolation der Elektroden kann ein Modulator seinen Schaltzustand lange, verglichen mit den typischen Bildaufbauzeiten eines Displays, halten, so dass nicht wie bei alternativen Technologien eine zusätzliche Speicherzelle zum Halten der angelegten Spannung für die Aufrechterhaltung eines bestimmten Schaltzustandes erforderlich ist. Wenn also für die Einstellung eines bestimmten Schaltzustandes das Anlegen einer Spannung erforderlich ist, kann diese danach wieder abgenommen werden, ohne dass sich der Schaltzustand für einen längeren Zeitraum ändert. Soll der Schaltzustand bewusst geändert werden, kann dies durch ein Kurzschließen der Elektroden erreicht werden.

[0065] Durch Anlegen einer analogen Spannung ist die Membran des Modulators kontinuierlich auslenkbar. Damit ist die Phase der reflektierten bzw. transmittierten Welle kontinuierlich veränderbar. Das erlaubt den Einsatz solcher Bauelemente in der adaptiven Optik zur Korrektur bzw. Veränderung von Wellenfronten.

[0066] Ein typisches Problem bei der Herstellung und dem Betrieb von mikrosystemtechnischen Bauelementen, die auf beweglichen Membranstrukturen basieren, ist das Verkleben bzw. Anhaften der Membranstrukturen auf dem Substrat bzw. auf der Basischicht (sog. Sticking). Dieses kann entweder bei der Herstellung auftreten (z.B. beim Trocknen nach einer Opferschichtätzung durch die Oberflächenspannung der Flüssigkeit) oder im Betrieb des Bauelementes, wenn z.B. eine Membran so weit ausgelenkt wird, dass sie auf dem Untergrund aufliegt und sich von dort nicht mehr ablösen kann. Eine Membran wird normalerweise mit einer bestimmten, mechanischen Schichtspannung (zumeist Zugspannung) hergestellt, d.h. die Membran würde sich zusammenzie-



hen, wenn sie nicht am Rande eingespannt wäre.

[0067] Fig. 13 zeigt die Auswirkungen eines Stressgradienten für den allgemeinen Fall einer auf einem Substrat 90 direkt aufgetragenen Membran 91. Grundsätzlich kann eine Membran nicht nur mit einer Schichtspannung (= Schichtstress), sondern auch mit einem Stressgradienten versehen werden. Bei einem positivem Stressgradienten haben die Membranen oben eine höhere Zugspannung als unten, d.h. wenn die Membran 91 nicht mehr auf dem Substrat 90 (oder der Basisschicht bei dem erfindungsgemäßen Modulator) bzw. an ihrer Aufhängung festgehalten würde, würde sie sich nach oben krümmen (91a). Bei einem negativen Stressgradienten würde sich die Membran 91 entsprechend nach unten krümmen (91b).

[0068] Die Einstellung eines bestimmten Stressgradienten kann zur Vermeidung von Sticking (Anhaftung der Membran 91 an dem Substrat 90) eingesetzt werden. Mit einem ausreichend starken positiven Stressgradienten kann das Sticking verhindert werden, bei einem negativen Stressgradienten stickt die Membran besonders leicht. Diese Methode zur Vermeidung von Sticking lässt sich nicht nur bei dem beschriebenen optischen Modulator einsetzen, sondern kann bei allen Bauelementen zum Einsatz kommen, für deren Funktion dünne, gegen Sticking anfällige Membranen erforderlich sind, wie etwa mikromechanische Mikrofone, Drucksensoren, kapazitive Ultraschallwandler und dergleichen.

[0069] Zur Erzeugung eines positiven Stressgradienten ist es zweckmäßig, bei der Abscheidung einer Schicht die Abscheidungsparameter in geeigneter Weise zu ändern. Beim LPCVD-Siliziumnitrid kann das beispielsweise geschehen, indem während der Abscheidung die Temperatur von z.B. 840°C um wenige Grad gesenkt wird oder indem die Zusammensetzung der Prozessgase ( $\text{SiCl}_2\text{H}_2$ ,  $\text{NH}_3$ ) verändert wird, d.h. dass der Gasfluss von  $\text{SiCl}_2\text{H}_2$  während der Abscheidung erhöht wird. Wird eine Membran durch einen Stapel von Schichten gebildet, kann die Einstellung eines positiven Stressgradienten geschehen, indem oben Schichten mit einer größeren Schichtspannung abgeschieden werden als unten.

[0070] Bisher war es zumeist das Ziel, einen Stressgradienten zu vermeiden, da dieser ein unerwünschtes Verbiegen bzw. „Aufwellen“ von nicht geeignet aufgehängenen Membranen verursacht. Durch absichtliche Erzeugung eines Stressgradienten, beispielsweise in der oben beschriebenen Weise, kann jedoch in vorteilhafter Weise das Problem des Stickings vermieden werden, wobei dieser Gedanke sowohl bei dem erfindungsgemäßen optischen Modulator als auch bei anderen Bauelementen mit beweglichen Membranen eingesetzt werden kann.

#### Patentansprüche

1. Optischer Modulator zum Modulieren der Intensität und/oder Phase von einfallendem Licht mit-

tels konstruktiver oder destruktiver Interferenz mit einer auf einem Substrat aufgetragenen Basisschicht und wenigstens einer darauf angebrachten Membranschicht, wobei zwischen der Basisschicht und der wenigstens einen Membranschicht in einem Teilbereich ein Hohlraum gebildet ist, und mit Mitteln zum Anlegen einer elektrischen Spannung zwischen der Membranschicht und dem Substrat zur Veränderung des Abstandes in dem durch den Hohlraum gebildeten Teilbereich zwischen der Basisschicht und der wenigstens einen Membranschicht, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Basisschicht und die wenigstens eine Membranschicht aus Siliziumnitrid, insbesondere LPCVD-Siliziumnitrid, hergestellt sind.

2. Optischer Modulator nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die dem Hohlraum zuweisende Fläche der Basisschicht und/oder der wenigstens einen Membranschicht in den Hohlraum hineinragende Abstandshalter aufweist.

3. Optischer Modulator nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass die Mittel zum Anlegen einer elektrischen Spannung eine auf der Außenseite der äußersten Membranschicht aufgetragene Elektrode aufweisen, insbesondere dass die Elektrode nur in einem Elektrodenteilbereich derart aufgebracht ist, dass der verbleibende Bereich der Außenseite dieser Membranschicht als optisch nutzbare Fläche zur Intensitäts- und/oder Phasenmodulation des einfallenden Lichts dient und dass der Hohlraum wenigstens in einem dem Lichteinfallsbereich direkt gegenüberliegenden Hohlraumbereich der Membranschicht gebildet ist.

4. Optischer Modulator nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass die Elektrode transparent, insbesondere als dünne dotierte Polysiliziumschicht, ausgestaltet und auf der gesamten Außenseite der äußersten Membranschicht aufgebracht ist.

5. Optischer Modulator nach einem der vorstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass das Substrat aus transparentem Material, insbesondere Quarz, hergestellt ist und dass die Mittel zum Anlegen einer elektrischen Spannung eine auf oder in dem Substrat, insbesondere zwischen der Basisschicht und dem Substrat, eine transparente Gegenelektrode, insbesondere eine dünne Polysiliziumschicht, aufweisen.

6. Optischer Modulator nach einem der vorstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Schichtdicken der Basisschicht und der wenigstens einen Membranschicht derart gewählt sind, dass der optische Modulator für eine gewünschte Wellenlänge optimiert ist.

7. Optischer Modulator nach einem der vorstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass

das einfallende Licht mittels einer Mikrolinse, eines Mikrolinsengitters oder eines diffraktiven optischen Elements, insbesondere mittels eines einstufigen diffraktiven optischen Elements oder einer Zonenplatte, fokussiert wird, insbesondere auf die optisch nutzbare Fläche der Außenseite der äußersten Membranschicht oder auf ein separates Objekt zur Lichteinkopplung.

8. Optischer Modulator nach einem der vorstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass das einfallende Licht mittels eines Beugungselements, insbesondere mittels eines Beugungsgitters oder eines Prismas, gebeugt wird, so dass die Spektralanteile des einfallenden Lichts unter verschiedenen Winkeln auf die Außenseite der äußersten Membranschicht auftreffen.

9. Optischer Modulator nach einem der vorstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass das Substrat ein zentral dem Hohlraum gegenüber liegendes Loch aufweist zur Einfügung einer Lichtleitfaser oder zum Betrieb des Modulators in Transmission.

10. Optischer Modulator nach einem der vorstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass der Hohlraum, die Basisschicht und die wenigstens eine Membranschicht eine im wesentlichen gleichmäßige Dicke und Homogenität aufweisen.

11. Optischer Modulator nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, dass die optisch nutzbare Fläche der Außenseite der äußersten Membranschicht in mehrere Teilflächen, insbesondere unterschiedlicher Größe, und die Elektrode in den Teilflächen zugeordnete, separat ansteuerbare Teilelektroden unterteilt sind.

12. Optischer Modulator nach einem der vorstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass der Umriss der wenigstens einen Membranschicht, insbesondere der optisch nutzbaren Fläche und der Elektrode, eine hexagonale Form aufweist.

13. Optischer Modulator nach einem der vorstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass der Modulator allseitig aufgehängt ist.

14. Optischer Modulator nach einem der vorstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass eine Steuereinheit zur Ansteuerung des optischen Modulators mittels eines analogen oder digitalen, insbesondere pulswidenmodulierten Signals vorgesehen ist.

15. Optischer Modulator nach einem der vorstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die wenigstens eine Membranschicht einen positiven Stressgradienten aufweist.

16. Display, insbesondere Projektionsdisplay, mit einer Vielzahl von an Gitterpunkten eines Gitters angeordneten optischen Modulatoren nach einem der vorstehenden Ansprüche, und mit einer Steuereinheit zur Ansteuerung der Modulatoren.

17. Verwendung des optischen Modulators nach einem der vorstehenden Ansprüche zum Modulieren der Intensität und/oder Phase, zum Schalten oder zur Korrektur bzw. Veränderung von Wellenfronten von einfallendem Licht.

18. Verwendung des optischen Modulators nach einem der vorstehenden Ansprüche als Speicherzelle zur Speicherung von Information.

19. Verfahren zur Herstellung eines optischen Modulators, insbesondere nach einem der Ansprüche 1 bis 15, zum Modulieren der Intensität und/oder Phase von einfallendem Licht mittels konstruktiver oder destruktiver Interferenz, wobei zwischen der Basisschicht und der wenigstens einen Membranschicht in einem Teilbereich ein Hohlraum gebildet ist, und mit Mitteln zum Anlegen einer elektrischen Spannung zwischen der Membranschicht und dem Substrat zur Veränderung des Abstandes in dem durch den Hohlraum gebildeten Teilbereich zwischen der Basisschicht und der wenigstens einen Membranschicht, dadurch gekennzeichnet, dass die Basisschicht und die wenigstens eine Membranschicht aus Siliziumnitrid, insbesondere LPCVD-Siliziumnitrid, hergestellt werden.

20. Verfahren nach Anspruch 19, dadurch gekennzeichnet, dass der Hohlraum mittels einer Opferschicht hergestellt wird, die nach Bildung der Basisschicht und der angrenzenden Membranschicht herausgeätzt wird.

21. Verfahren nach Anspruch 19, dadurch gekennzeichnet, dass die Opferschicht aus polykristallinem Silizium (Polysiliziummaterial) hergestellt wird.

22. Verfahren nach Anspruch 20 oder 21, dadurch gekennzeichnet, dass die Opferschicht aus zwei Opferteilschichten, insbesondere eine Polysiliziumschicht und eine Siliziumoxidschicht, gebildet wird und dass eine Opferteilschicht zur Bildung von Abstandshaltern zwischen der Basisschicht und der an den Hohlraum angrenzenden Membranschicht strukturiert wird.

23. Verfahren nach einem der Ansprüche 20 bis 22, dadurch gekennzeichnet, dass die wenigstens eine Membranschicht, die Basisschicht und die Opferschicht mittels des LPCVD-Verfahrens abgeschieden werden.

24. Verfahren nach Anspruch 23, dadurch gekennzeichnet, dass bei der Abscheidung der wenig-

tens einen Membranschicht die Abscheidungstemperatur variiert wird, insbesondere zeitweise abgesenkt wird, und/oder die Zusammensetzung der Prozessgase variiert wird, insbesondere der Gasfluss von  $\text{SiCl}_2\text{H}_2$  erhöht wird.

Es folgen 10 Blatt Zeichnungen

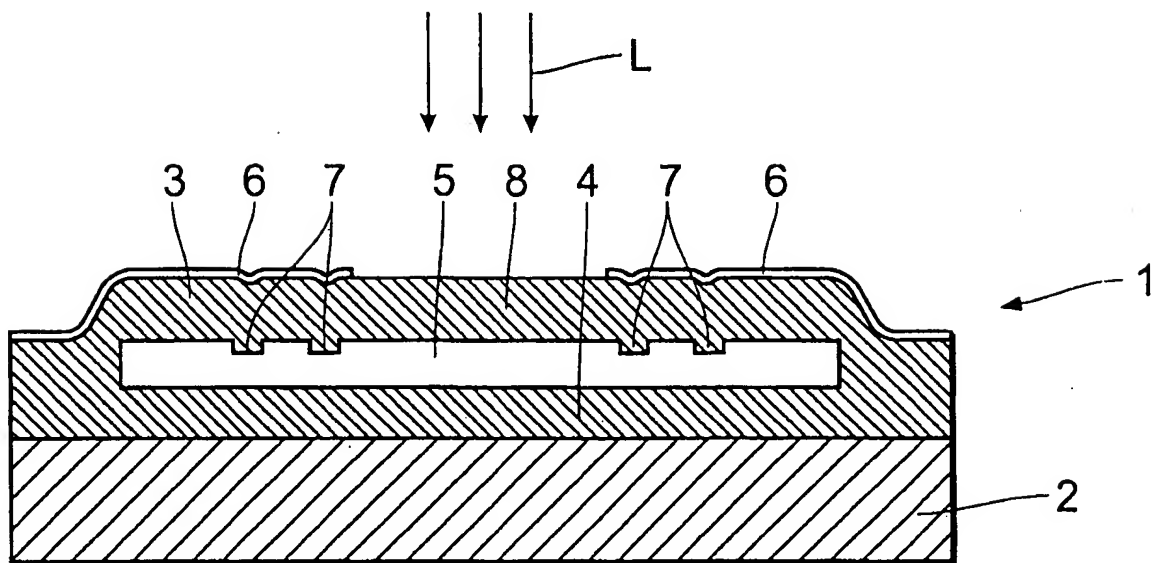


Fig. 1a

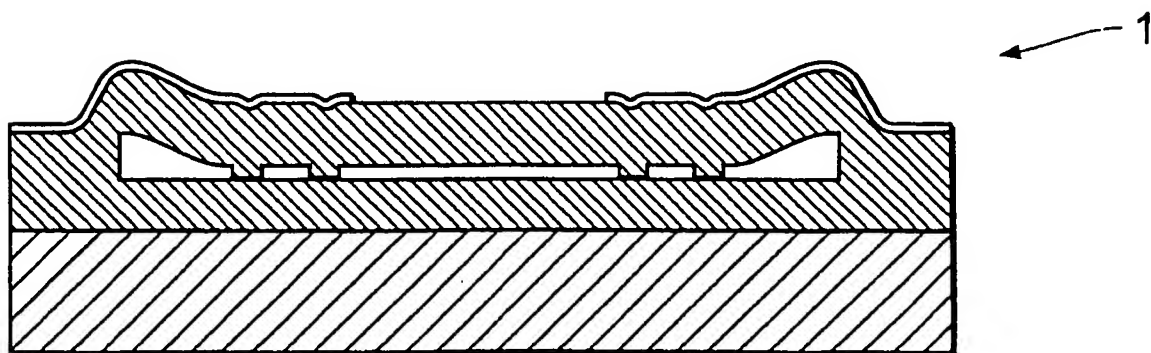


Fig. 1b

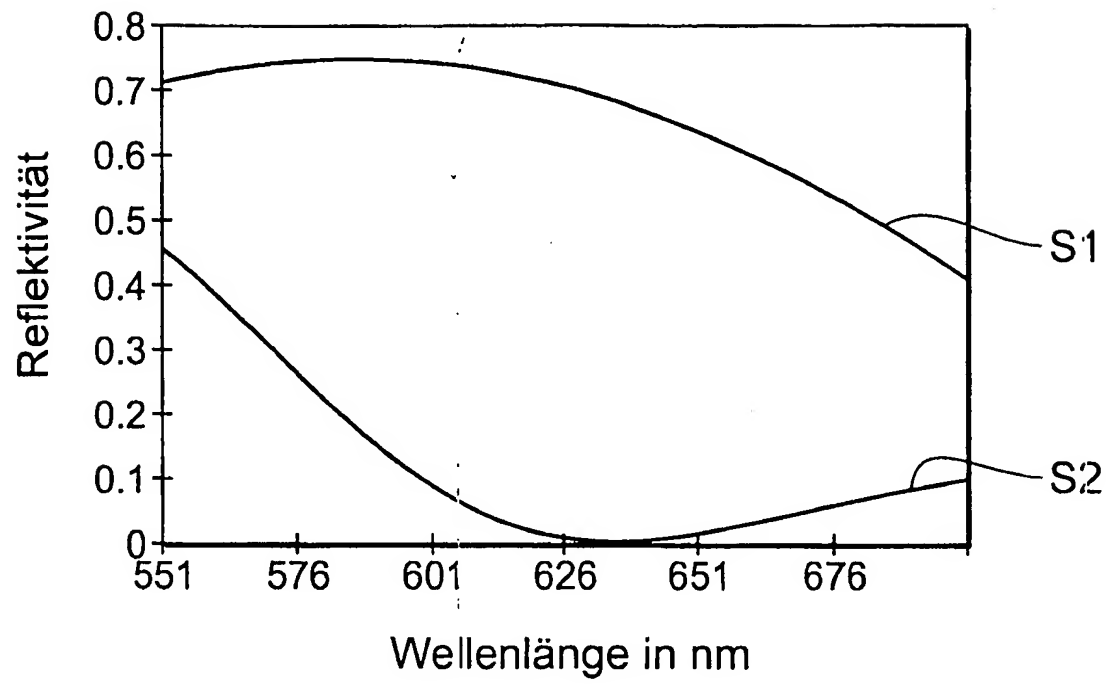


Fig. 2

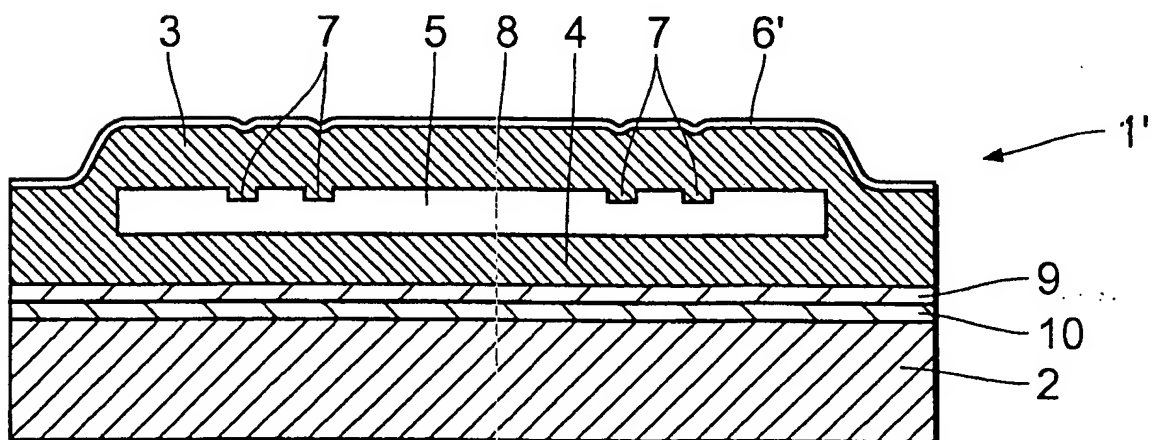


Fig. 3

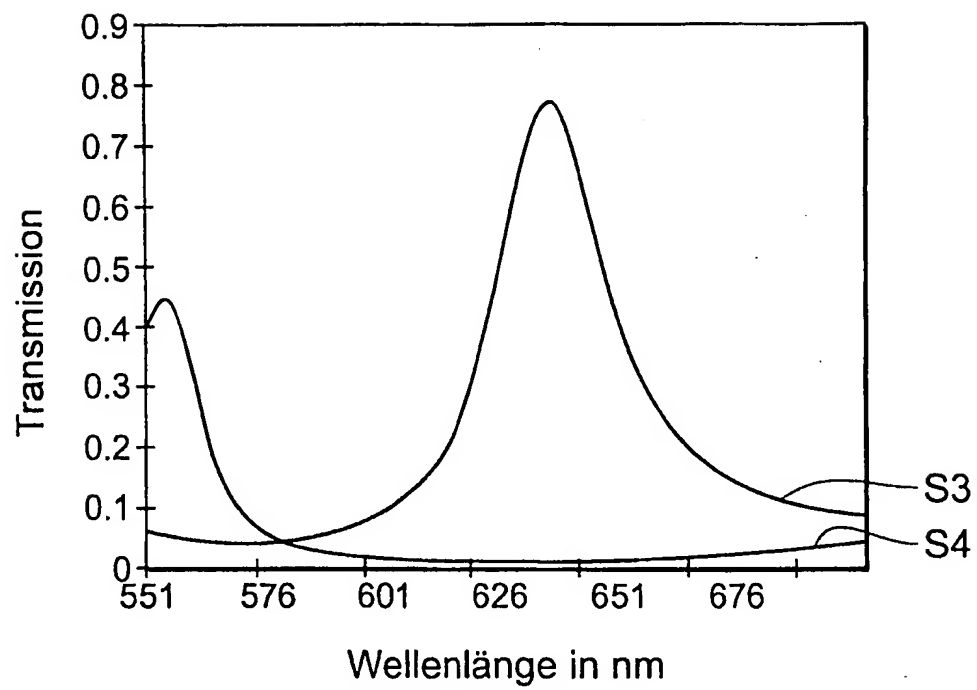


Fig. 4

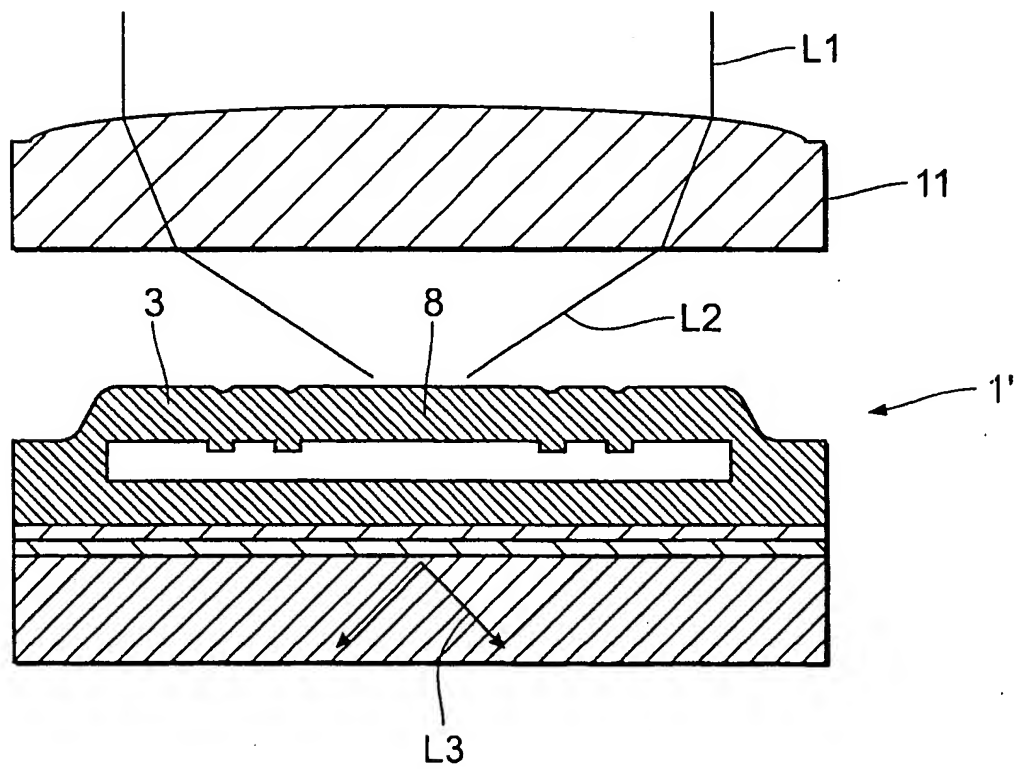


Fig. 5



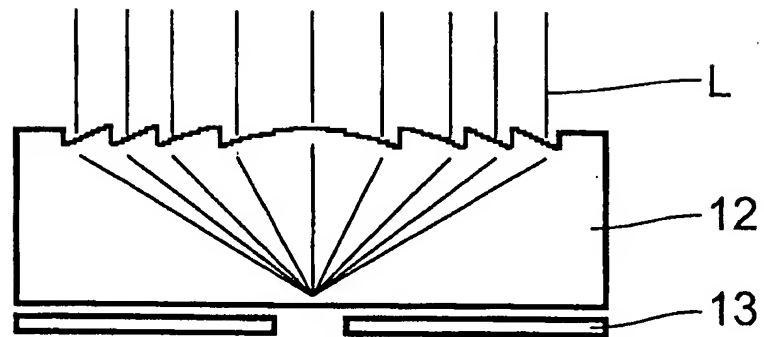


Fig. 6a

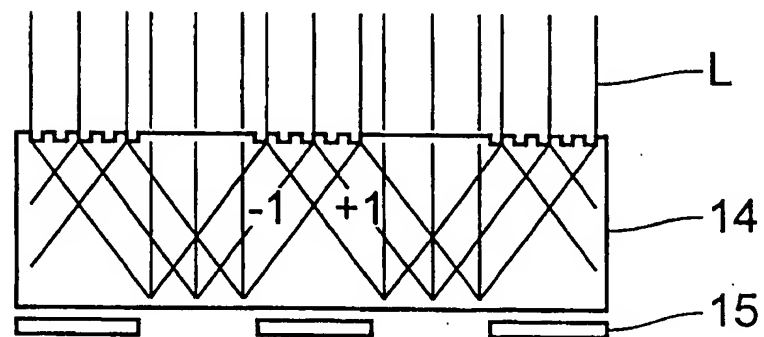


Fig. 6b

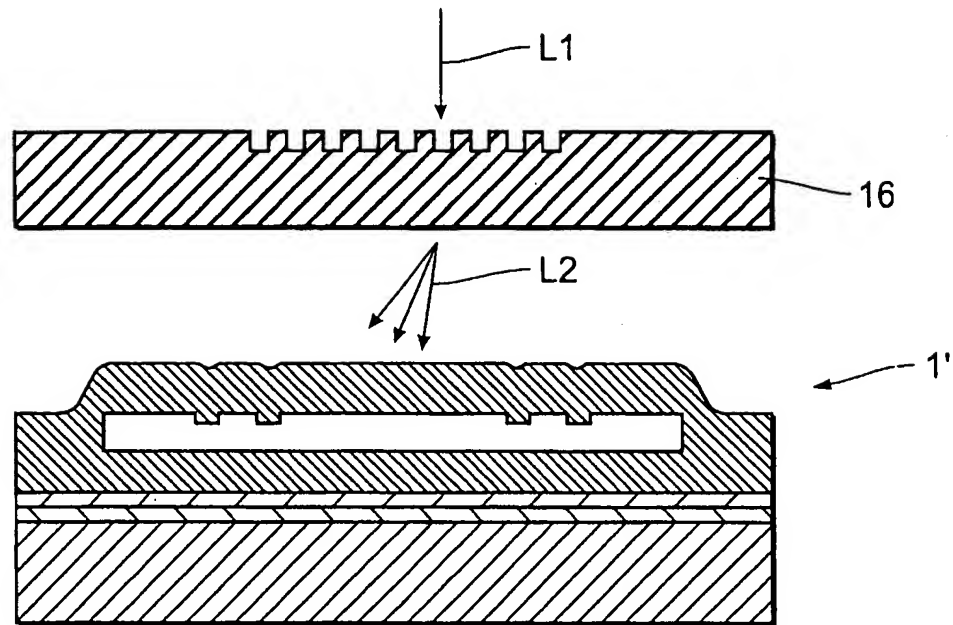


Fig. 7

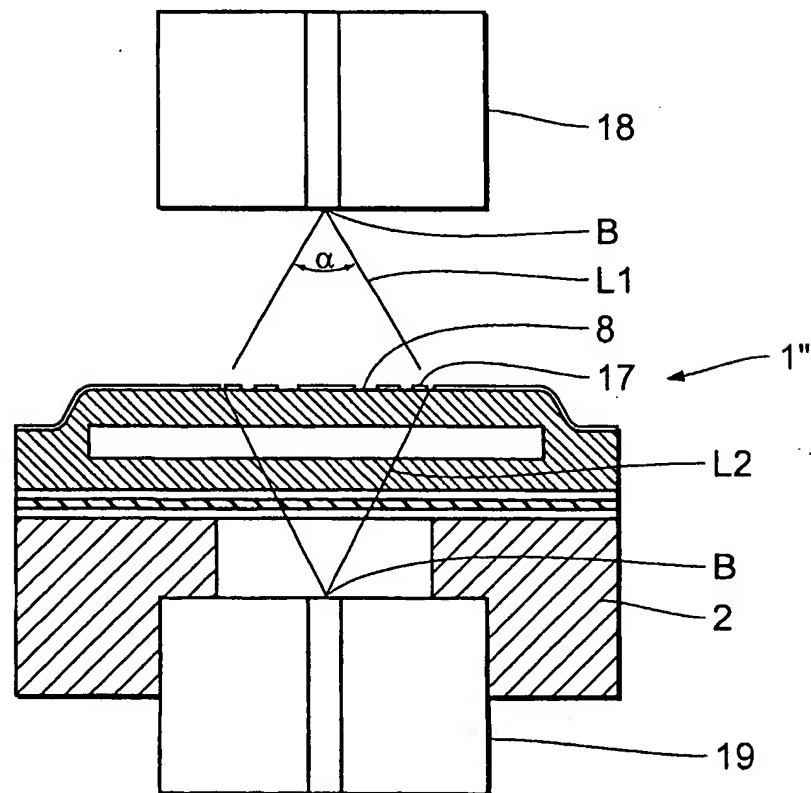


Fig. 8

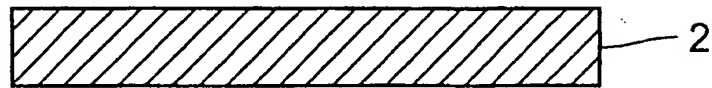


Fig. 9a

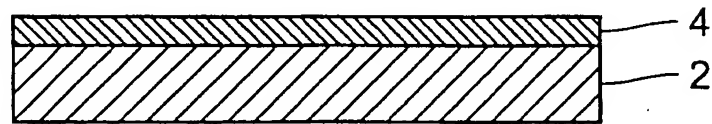


Fig. 9b

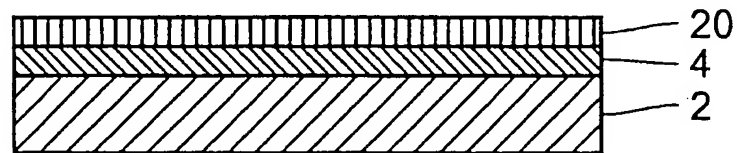


Fig. 9c

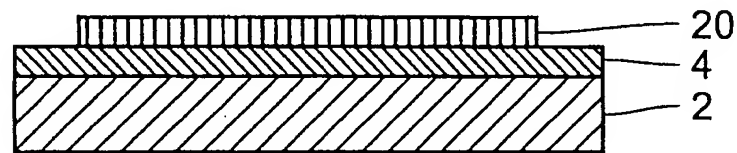


Fig. 9d

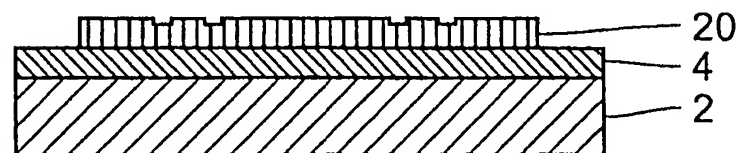


Fig. 9e

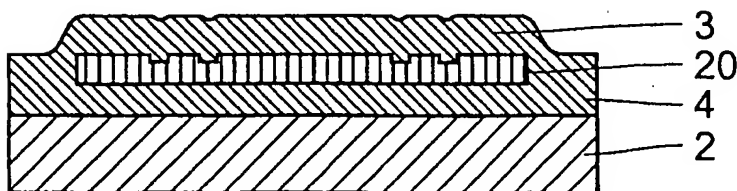


Fig. 9f

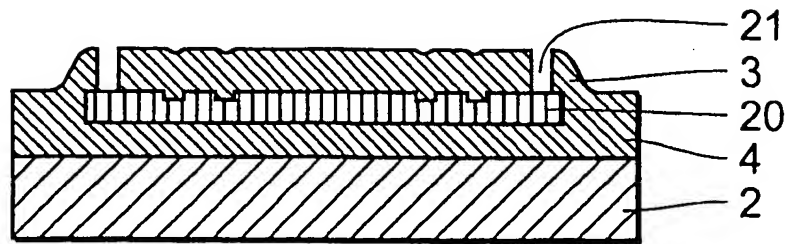


Fig. 9g

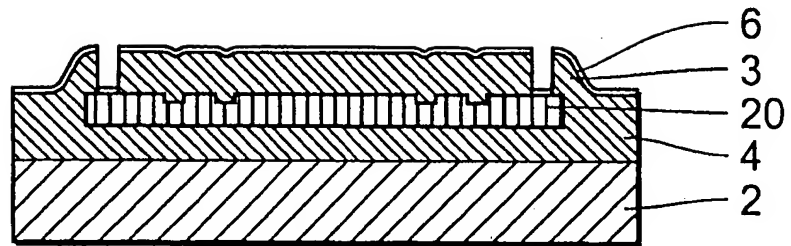


Fig. 9h

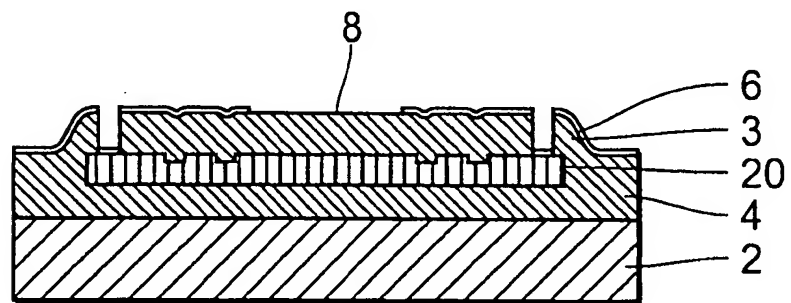


Fig. 9i

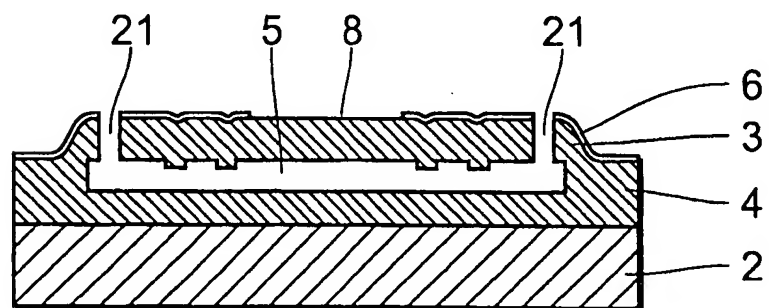


Fig. 9j

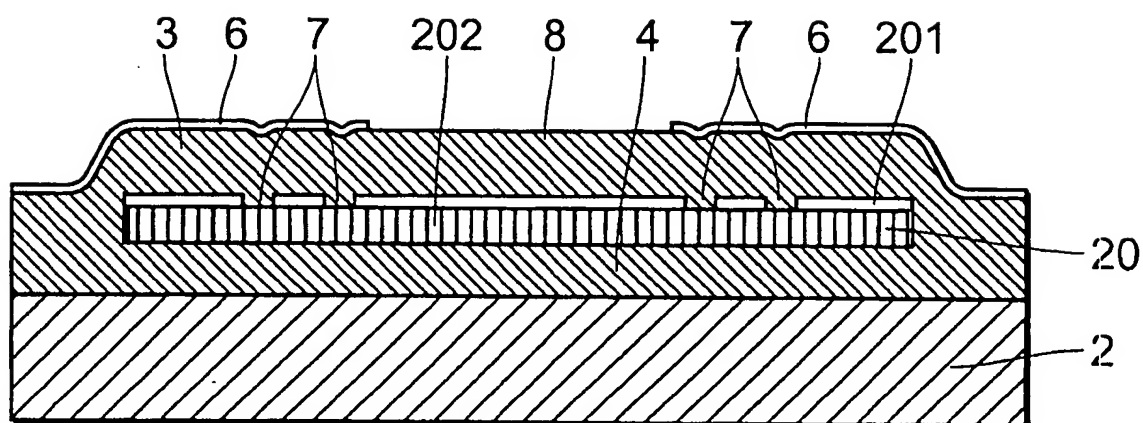


Fig. 10





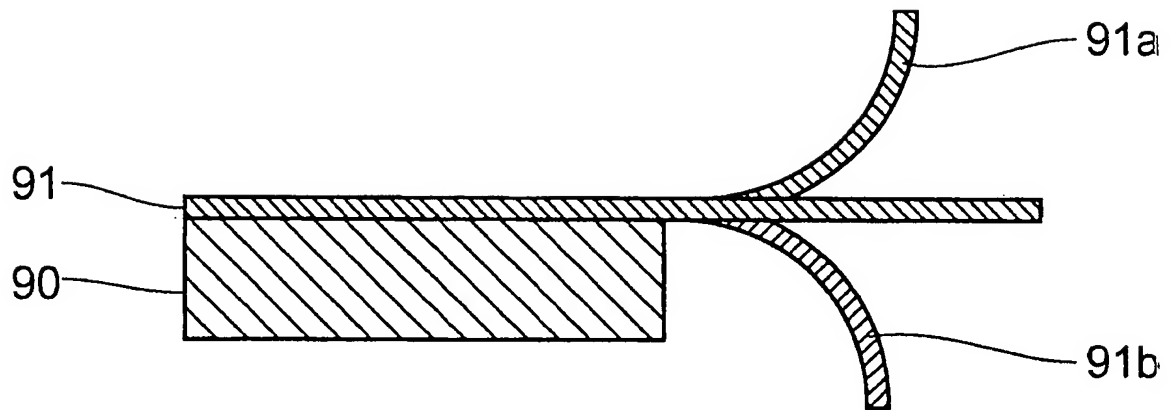


Fig. 13